

Forward Converter 용 변압기의 유한요소 해석에 관한연구

김현수^a, 김병택^a, 권병일^a, 박승찬^b
 한양대학교 전기공학과^a, 한양대학교 공학기술연구소^b

Finite Element Analysis of Transformer for Forward Converter

H. S. Kim^a, B.T.Kim B^a, I. Kwon^a, S. C. Park^b
 Dept. of Electrical Eng., Graduate School of Hanyang Univ.^a, RIET^b

Abstract - This paper deals with analysis of high frequency transformer for forward converter using the finite element method and circuit analysis. Finite element analysis considering magnetic nonlinearity of ferrite core and circuit analysis are utilized when converter switch(FET) is on and off, respectively.

As a result, the primary current and load current of a forward converter are obtained under the various load conditions.

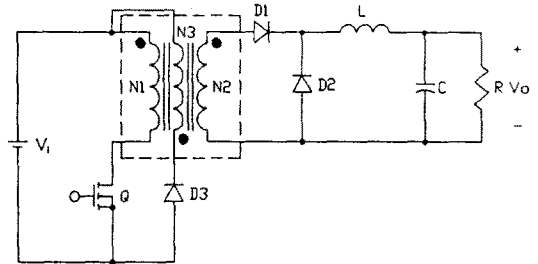


그림 1 Forward converter 회로도
 Fig. 1 Forward converter circuit

1. 서 론

최근 전자제품의 소형화와 이동통신의 급속한 발전으로, 이들 장치에 전원을 공급하는 스위칭 모드 파워 서플라이(Switching Mode Power Supply)의 소형화가 요구되게 되었다. SMPS에서 가장 큰 부피를 차지하는 부품은 변압기이며, 이를 소형화하기위해서 스위칭 주파수를 증가시키게 되었다[1].

그러나, 스위칭 주파수가 증가함에 따라 변압기에 미치는 여러 가지 현상 - 권선의 표피효과, 근접효과 및 코어손실에 의한 발열 등 - 이 나타난다. 또한 자기회로에 미치는 이러한 영향에 의해 SMPS의 전기회로 출력에 파형의 왜곡 및 전압의 변동과 스위칭 손실과 같은 영향이 발생된다.

본 논문에서는 forward converter 용 변압기의 특성고찰을 위한 종래의 선형 등가회로 해석 대신에, 변압기와 converter 회로를 결합시켜 비선형 해석을 하는 방법을 다룬다. 즉, 변압기 해석은 2차원 시간차분 유한요소법을 채택하여 코어의 포화를 고려한 비선형 해석을 하였고, 전기회로 부분은 turn-on 구간과 turn-off 구간으로 나누어 모델링하여 해석하였다. 특성해석 결과로서, 변압기의 1차측 전류와 부하전류를 나타내었다.

2. Forward Converter의 모델링

본 연구에 적용된 forward converter 모델은 그림 1에, 사양 및 제원은 표 1에 나타내었다 (2).

표 1. Converter의 사양 및 제원

입력 전압	50V
출력 전압	5V
출력 전류	0.1~5A
변 압 기	1차측 턴수 : 18
	2차측 턴수 : 5
	Reset 권선 턴수 : 18
페라이트	H7B(TDK 社)-E130
주 파 수	33kHz

그림 1의 converter 회로를 해석하기 위하여 다음과 같은 2가지 가정을 설정하여 간이 등가모델을 설정하였으며, 이로부터 회로방정식을 유도하였다.

1) 변압기 2차측 회로 부분의 capacitance는 대용량의 2500 [μF] 으로서 출력 전압의 ripple를 1%이하로 설계하였으므로, 출력전압의 변동분은 무시한다.

2) 스위칭 소자인 FET Q가 off시 reset 권선에 의하여 페라이트 코어는 완전히 감자되고, 이 때 1차측에 흐르는 여자전류는 converter 해석시 무시한다.

위의 가정을 고려하여 만든 간이 등가회로는 turn-on 시와 turn-off 시로 구분하여 각각 그림 2와 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

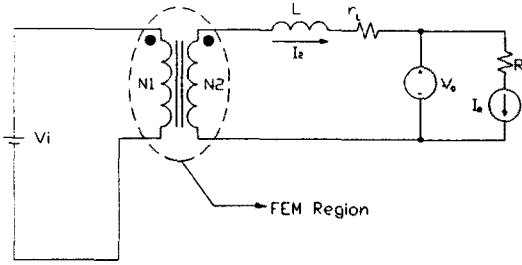


그림 2 FET Q가 on 될 때
Fig. 2 When FET Q turns on

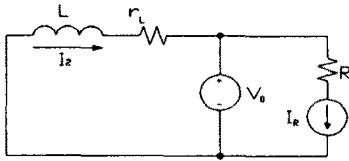


그림 3 FET Q가 off 될 때
Fig. 3 When FET Q turns off

위의 그림 2의 회로방정식은 식 (1), (2), 그림 3의 회로 방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\Phi_1}{dt} + L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = V_i \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi_2}{dt} - L \frac{di_2}{dt} - (R_2 + r_L) i_2 = V_o \quad (2)$$

$$L \frac{di_2}{dt} + r_L i_2 = -V_o \quad (3)$$

여기서, R_1 , R_2 , r_L , L 은 각각 1차저항, 2차저항, 인덕터의 저항 및 인덕턴스이다.

식 (1)과 (2)는 그림 2에 나타난 turn-on 시의 회로방정식을 변압기를 중심으로 각각 1차측과 2차측으로 나누어서 나타내었고, 식 (3)은 turn-off 시의 회로방정식을 나타내었다.

3. 유한 요소 해석

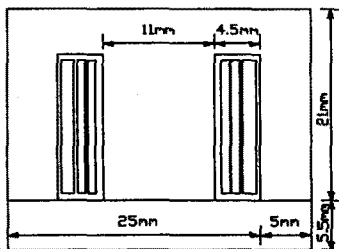


그림 4. 변압기 해석 모델
Fig. 4 Analysis model of the Transformer

유한 요소 해석 모델인 forward converter용 변압기는 그림 4와 같다. 그림 4의 변압기 모델을 유한 요소 해석을 하기 위하여, 히스테리시스 현상 및 코어내부의 eddy current는 무시한다.

변압기를 2차원 해석할 경우에 다음과 같은 지배방정식이 구성된다(3).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \quad (4)$$

식 (1)과 식 (2)의 회로 방정식을 후퇴 차분법을 적용하여 다시 유도하면, 각각 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\Phi_1^t + (\Delta t R_1 + L_1) i_1^t = \Phi_1^{t-\Delta t} + L_1 i_1^{t-\Delta t} + \Delta t V_i \quad (5)$$

$$\Phi_2^t - [(R_2 + r_L) \Delta t + L] i_2^t = V_o \Delta t + \Phi_2^{t-\Delta t} - L i_2^{t-\Delta t} \quad (6)$$

지배방정식으로부터 정식화한 차분 방정식과 후퇴 차분법에 의하여 시간미분항을 근사화한 회로방정식을 결합하여 시스템 matrix를 구하면, 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [H] & [M] \\ [Q] & [Z] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ [F] \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, $[I] = \{i_1^t \ i_2^t\}^T$.

$$[Z] = \begin{bmatrix} \Delta t R_1 + L_1 & 0 \\ 0 & -[(R_2 + r_L) \Delta t + L] \end{bmatrix}$$

$$[F] = \begin{bmatrix} \Phi_1^{t-\Delta t} + L_1 i_1^{t-\Delta t} + \Delta t V_i \\ \Delta t V_o + \Phi_2^{t-\Delta t} - L i_2^{t-\Delta t} \end{bmatrix}$$

4. 해석 결과

그림 5는 페라이트 변압기 내부의 자속선도이며, 그림 6과 그림 7은 각각 중부하와 경부하일 때의 변압기 1차측 전류와 부하전류의 파형을 나타낸 것이다. 이때 1차측의 외부 인가 전압의 duty 비는 0.2이며, 인가 전압의 스위칭 주파수는 33kHz이다. 그림 1의 FET Q가 on 될 때의 변압기의 1차측 및 2차측 전류는 식(2)의 해로부터 구하였으며, Q가 off 될 때의 2차측 전류는 식 (3)의 해로부터 구하였다.

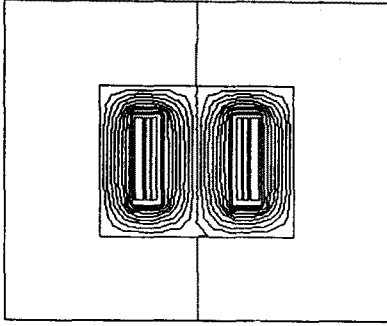
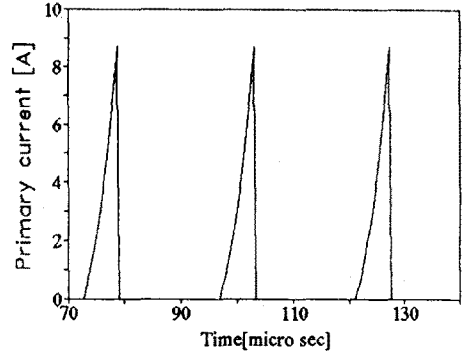
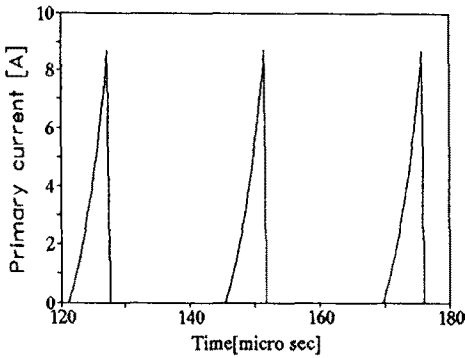


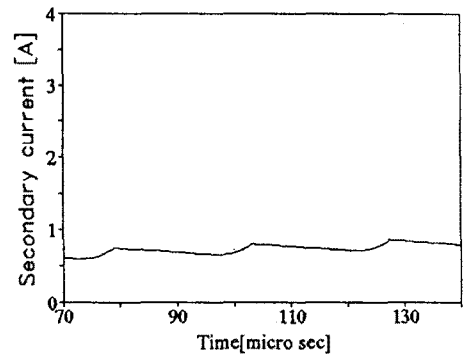
그림 5 자속선도
Fig. 5 Flux lines



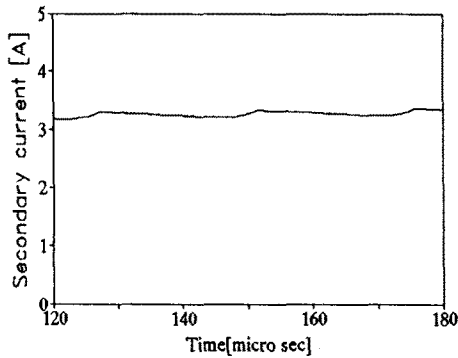
(a) 1차측 전류



(a) 1차측 전류



(b) 2차측 전류



(b) 2차측 전류

그림 6 중부하일 경우
(duty ratio=0.2, fs=33kHz)

그림 7 경부하일 경우
(duty ratio=0.2, fs=33kHz)

5. 결 론

본 논문에서는 forward converter용 페라이트 변압기를 FET가 on일 경우에는 converter의 회로를 고려하여 유한 요소 해석을 하였으며, FET가 off일 경우에는 해석적 방법에 의하여 2차측 전류를 구하였다. 본 해석 방법은 부하 및 duty ratio의 변화에 따라 변압기를 포함한 converter의 해석이 가능하므로, converter용 변압기의 최적 설계가 가능하리라 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] R. Asensi, J.A. Cobos, "A Full Procedure to Model High Frequency Transformer Windings", IEEE, pp. 856-863, 1994.
- [2] 김희준, 스위치모드 파워서플라이, 성안당, 1996.
- [3] 임달호, 유한요소법, pp. 100-103, 동명사, 1995.